

Розробка та дослідження прецизійної сферичної опори ковзання

Наведена інформація про розроблену прецизійну опору ковзання. Викладені результати досліджень характеристик опори, зокрема визначені динамічні моменти опору при поперечно-кутових переміщеннях опори та частотні характеристики опор по моменту опору.

просторовий механізм, сферична опора, динамічний момент тертя, частотні характеристики

Вступ

В сучасному технологічному обладнанні широко використовуються просторові механізми із прецизійними сферичними опорами. Сферичні опори є найбільш складними і відповідальними вузлами просторових механізмів. Розробка прецизійних сферичних опор є актуальною науково технічною проблемою.

Проблема розробки сферичних опор в загальному вигляді включає створення прогресивних схемних рішень опор із мінімальним коефіцієнтом опору при відсутності люфтів і високій стабільності положення опори.

Розробка прецизійних сферичних опор пов'язана із важливими науковими і практичними завданнями створення сучасного технологічного обладнання, зокрема промислових роботів, металорізальних верстатів, вимірювальних машин та інших [1].

Відсутність раціональних технічних рішень сферичних опор стримує розвиток технологічного обладнання на основі просторових механізмів.

В дослідженнях і публікаціях останнього часу [1] наявна значна кількість розробок різноманітних сферичних опор. Дослідження стосуються розробки принципових схем та визначення характеристик різноманітних конструкцій опор.

В результаті аналізу останніх досліджень і публікацій [1,2] встановлено, що в інформаційних джерелах наявна значна кількість схемних і конструктивних рішень сферичних опор [2]. Як правило опори реалізуються на підшипниках кочення. Недоліками таких опор є складність конструкції, значна маса і габарити опор.

В наведених публікаціях визначені основні параметри опор: жорсткість, моменти опору та кінематичні залежності. Дослідження кінематики та інших характеристик здійснено для опор на підшипниках кочення.

Суттєвим чином знизити масо-габаритні параметри опор можна, застосувавши сферичні опори ковзання. Розробка і дослідження сферичних опор ковзання відноситься до невирішеної раніше частини загальної проблеми розробки сферичних опор просторових механізмів.

Суттєвою частиною проблеми є встановлення особливостей характеристик сферичних опор ковзання. Основними характеристиками є кінематичні залежності взаємного руху деталей опори, залежність моменту тертя при взаємному переміщенні деталей опори та динамічні (частотні) характеристики опор.

Дана стаття присвячена розробці принципово нового схемного рішення прецизійної сферичної опори ковзання та дослідження її характеристик, зокрема кінематичних характеристик і моментів тертя та динамічних частотних характеристик опор.

Конструкція прецизійної опори ковзання.

Розроблена конструкція опори має точний сферичний центр 1 виготовлений із надтвердого матеріалу (карбід бора) (рис. 1). Відхилення від сферичної поверхні центру не перевищує 1мкм. Із сферичною поверхнею центра взаємодіють трубчасті вставки 2.

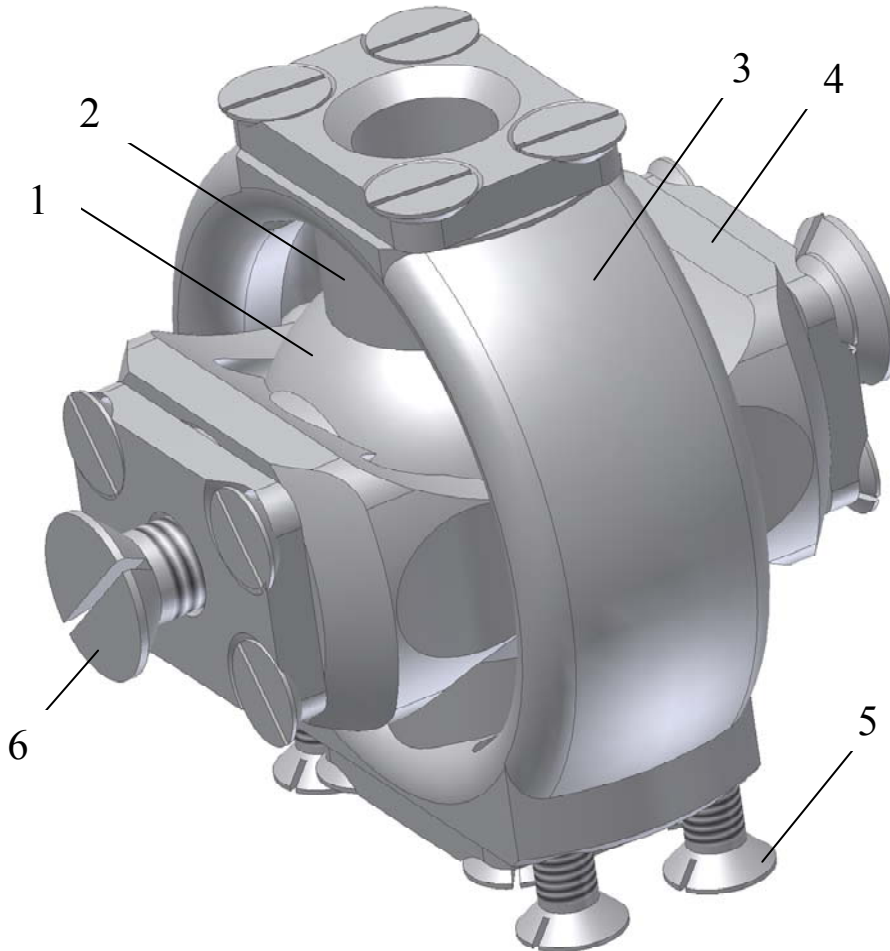


Рисунок 1 – Розроблена прецизійна сферична опора ковзання (із кожухом)

Всього в опорі є дві пари вставок. Одна пара з'єднана із нерухомим корпусом 3, а інша пара розміщена в рухомій рамці 4. Гвинти 5 служать для закріплення нерухомого корпусу, а гвинти 6 призначені для закріплення кожуха на рухомій рамці (на рисунку не показаний). Кожух з'єднано із рухомою ланкою просторового механізму. Прецизійна сферична опора забезпечує вільне кутове переміщення рухомої рамки 4 в межах конуса з кутом при вершині 30° , який є робочим діапазоном опори.

Кожна пара вставок має одну вставку, жорстко з'єднану із відповідною рамкою, а другу вставку – рухому в напрямку осі сфери. Рухома вставка підпружинена відносно рамки і притискається до сфери, утворюючи з нею рухомий контакт. В контакті між сферою і вставкою наявний шар мастила. Застосовується суміш графіту та мінеральної оливи. Зазор між поверхнями вставки та сфери є незначним. В межах даного зазору діють розподілені нормальні і тангенціальні напруження. Сумарна дія розподілених напружень забезпечує несучу здатність опори при взаємному переміщенні деталей.

Основною задачею досліджень характеристик опори є встановлення закономірностей руху мастила в малорозмірних зазорах між рухомими поверхнями сфери і вставок, та визначення на цій основі зв'язку силових і кінематичних параметрів опори.

Дослідження характеристик опори

Основною характеристикою опори є динамічний момент тертя який виникає між рухомою сферою і вставками. Динамічний момент тертя залежить від кутової швидкості обертання сфери і мікропереміщень сфери відносно вставки. Кутова швидкість обертання та мікропереміщення сфери є векторними величинами.

Для опису змінного в часі вектора кутової швидкості обертання сфери $\vec{\omega}(t)$ використаємо три параметри: модуль кутової швидкості $\omega(t)$, та кути $\gamma(t)$ та $\delta(t)$ які характеризують положення вектора кутової швидкості в декартовій прямокутній системі координат x, y, z (рис. 2).

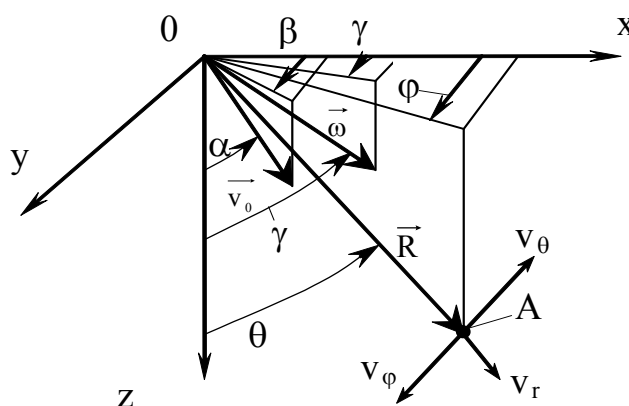


Рисунок 2 – Схема опису кінематичних характеристик відносного руху сфери і вставки

Для опису змінної в часі швидкості мікропереміщень сфери $\vec{V}_0(t)$ приймемо модуль переміщення сфери $v_0(t)$ та кути $\alpha(t)$, $\beta(t)$, що визначають напрямки швидкості сфери в системі координат x, y, z .

Кожна точка A контакту між сферою і вставкою характеризується радіус-вектором \vec{R} який має модуль R і кутовими координатами θ і ϕ . Відносні швидкості переміщення поверхонь сфери і вставки мають три складові v_r , v_θ , v_ϕ .

Відносні швидкості залежать від кінематичних параметрів переміщення сфери, а саме від кутової швидкості $\vec{\omega}$ та швидкості поступального переміщення сфери \vec{v}_0 . Згідно із [3] проєкції відносних переміщень точок сферичних поверхонь визначаються формулами

$$\begin{aligned} v_r &= v_0 [\cos \alpha \cdot \cos \theta + \sin \alpha \cdot \sin \theta \cdot \cos(\phi - \beta)]; \\ v_r &= v_0 [-\cos \alpha \cdot \sin \theta + \sin \alpha \cdot \cos \theta \cdot \cos(\phi - \beta) - \omega R \sin \gamma \cdot \sin(\phi - \delta)]; \\ v_r &= -v_0 \sin \alpha \cdot \sin(\phi - \beta) + \omega R [\cos \gamma \cdot \sin \theta - \sin \gamma \cdot \cos \theta \cdot \cos(\phi - \delta)]; \end{aligned} \quad (1)$$

Швидкість відносного ковзання поверхонь сфери і вставки визначається згідно співвідношення $v_T = \sqrt{v_\theta^2 + v_\phi^2}$.

Між сферичними поверхнями наявний шар мастила. Вважаючи зміни зазору між поверхнями незначними, дотичні напруження в напрямках Θ і φ в шарі мастила визначаються згідно залежностей [3]

$$\tau_{\Theta} = \mu V_{\Theta} / \Delta, \quad \tau_{\varphi} = \mu V_{\varphi} / \Delta,$$

де μ – динамічна в'язкість мастила;

Δ – середнє значення зазору між сферичними поверхнями.

Визначимо загальні моменти сил в'язкого опору, які діють на сферу. Для цього проінтегруємо елементарні дотичні зусилля по площі контакту. Для однієї вставки проекції моменту сил тертя відносно вісей x , y , z визначаються інтегралами

$$\begin{aligned} M_x &= \mu R^3 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} \left(v_{\varphi} \cdot \cos \theta + \frac{V_{\Theta} \cos \theta \sin \theta \sin \varphi}{\Delta} \right) d\theta; \\ M_y &= \mu R^3 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} \left(\frac{-v_{\Theta} \cos \theta + v_{\varphi} \cos \theta \sin \varphi}{\Delta} \right) d\theta; \\ M_z &= \mu R^3 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} \frac{v_{\varphi} \sin \theta}{\Delta} d\theta, \end{aligned} \quad (2)$$

де Θ_1 і Θ_2 – кутові координати кільцевої поверхні вставки, яка взаємодіє із сферою.

Модуль моменту сил тертя визначиться формулою

$$M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}.$$

Наведені вище формули (1), (2) в загальному вигляді визначають момент сил тертя при довільних поступальних і кутових переміщеннях сфери відносно вставки.

Прийmemo в якості характерного для опори синусоїдальне поперечно-кутове переміщення сфери в площині осей xz

$$\theta_c = A \sin vt, \quad (3)$$

A – амплітуда поперечно-кутових переміщень сфери;

v – частота переміщень.

При цьому кутова швидкість переміщення сфери складе

$$\omega_c = \frac{d\theta_c}{dt} = Av \cos vt.$$

Підставивши значення кутової швидкості та її кутових координат ($\dot{v} = 0$) в співвідношення (2) із врахуванням (1), одержимо після інтегрування відповідні значення моменту тертя. Обчислення проведені для різних моментів часу в межах кількох періодів синусоїдального переміщення сфери, визначеного формулою (3). Одержані розрахункові точкові графіки згладжені за допомогою кубічних сплайнів (рис.3).

Одержана залежність моменту тертя в часі $M_a(t)$ наближено відповідає синусоїдальній функції

$$M_c(t) = B \sin(vt + \psi), \quad (4)$$

де B , ψ – амплітуда і початкова фаза моменту опору, залежні від частоти коливань.

Для знаходження амплітуди B і початкової фази ψ використано стандартну процедуру апроксимації розрахункового моменту $M_a(t)$ синусоїдальною залежністю із визначенням коефіцієнтів згідно метода найменших квадратів. Графік визначеної синусоїдальної функції також наведено на рис. 3 (крива 3).

Розрахунки проведено для поперечно-кутових коливань постійної амплітуди $A=10^\circ$ з частотами $\nu=4, 8, \dots, 60 \frac{1}{c}$.

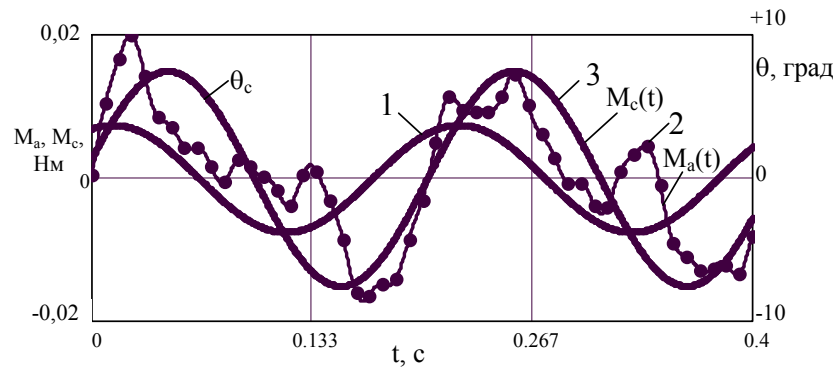


Рисунок 3 – Графіки зміни кутового положення сфери (крива 1), розрахункового моменту тертя (крива 2) та апроксимуючої момент тертя синусоїдальної функції (крива 3)

Для кожного розрахунку знайдено значення амплітудно-частотної $W(\nu)=B/A$ та фазо-частотної $\psi(\nu)$ характеристик [4].

Результати розрахунків відносних амплітуд та фазового зміщення наведені у вигляді точок на графіках амплітудно-частотної та фазо-частотної характеристики (рис.4).

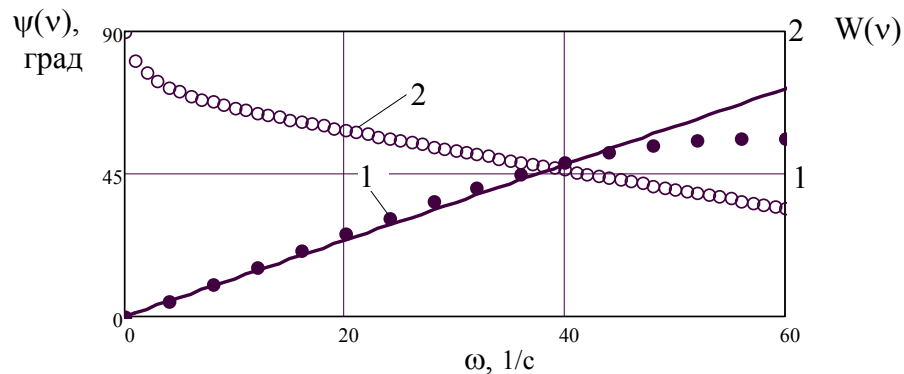


Рисунок 4 – Розрахункові графіки амплітудно-частотної (крива 1) та фазо-частотної (крива 2) характеристик опори

Із аналізу графіків випливає, що прецизійна опора ковзання має частотні характеристики, близькі до частотних характеристик реальної диференціюючої ланки [4]. При цьому момент тертя опори близький до похідної поперечно-кутового переміщення. Відхилення від даного закону мають місце при середніх та високих частотах коливань. Це пояснюється наявністю нелінійних залежностей сил тертя від переміщення сфери.

Зміна фази моменту тертя відносно кутового переміщення при частотах коливань $4 \dots 60 \frac{1}{c}$ не перевищує 30° . Амплітуди моменту тертя збільшуються із ростом частоти по закону, близькому до лінійного.

Висновки

1. Раціональною конструкцією прецизійної сферичної опори ковзання є опора із точним сферичним центром, виготовлена із надтвердого матеріалу з відхиленням від

сферичності 1...2 мкм. Із сферичним центром взаємодіють трубчасті вставки, встановлені в нерухомому корпусі та в рухомій рамці.

2. Наявність точної сфери рухомої та нерухомої вставок забезпечує необхідні умови змащення та компенсації зазорів при зносі контактуючих поверхонь.

3. Динамічний момент сил тертя прецизійної сферичної опори ковзання в основному залежить від кутової швидкості просторового повороту сфери і мало залежить від мікропереміщень сферичного центру.

4. Закон динамічного взаємозв'язку кутової швидкості повороту сфери і моменту тертя близький до диференціального з відхиленнями в області середніх і високих частот гармонічних поперечно-кутових переміщень сфери.

5. Як напрямок подальших досліджень рекомендується визначення впливу зносу поверхонь тертя на характеристики прецизійної опори ковзання.

Список літератури

1. Крайнев А.Ф. Идеология конструирования. – М.: Машиностроение, 2003.–384с.
2. Бушуев В.В. Практика конструирования машин.– М.: Машиностроение, 2006. – 448с.
3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. – 783с.
4. Бессекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – М.: Машиностроение, 1979. – 630с.

Приведенная информация о разработанной прецизионной опоре скольжения. Изложены результаты исследований характеристик опоры, в частности определены динамические моменты сопротивления при поперечно-угловых перемещениях опоры и частотные характеристики опор по моменту сопротивления.

The information about developed high-precision sliding bearing is given. The results of investigation of bearing characteristics are given. In particular, dynamic resistance moments by cross-angular travels of bearing and frequency characteristics of bearing by resistance moment are determined.